



Experimental Analysis of Perturb&Observe and Incremental Conductance Algorithms for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems

Mustafa Şeker^{1*}, Talha Tan², Sinem Melike Turan³

^{1*} Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sivas Türkiye, (ORCID: 0000-0002-3793-8786)
mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Lisans Öğrencisi, Sivas Türkiye
(ORCID: 0009-0007-9047-7361), trtb58@gmail.com

³ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Lisans Öğrencisi, Sivas Türkiye
(ORCID: 0009-0007-9047-7361), sinemmeliket@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 27 Temmuz 2023 ve Kabul Tarihi 27 Aralık 2023)

(DOI: 10.5281/zenodo.10646900)

REFERENCE/ATIF: Şeker, M., Tan, T. & Turan, S. M. (2024). Experimental Analysis of Perturb&Observe and Incremental Conductance Algorithms for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems. *European Journal of Science and Technology*, (53), 140-149.

Abstract

Photovoltaic (PV) systems are recognized as one of the most important energy sources in the world due to their natural advantages such as large installable areas, environmental friendliness, and energy efficiency. Photovoltaic cells have nonlinear current-voltage characteristics. Therefore, PV systems should be operated at the maximum power point (MPP) to obtain maximum output power. Many optimization algorithms developed today play an important role in optimizing the performance of photovoltaic (PV) generation systems and operating the system at the maximum power point. In this paper, a comprehensive evaluation of two widely used optimization methods, Perturb&Observe and Incremental Conductance, is presented using both experimental and Matlab/Simulink simulation models. Experimental studies were carried out using Arduino Uno and 1 KHz PWM output was used to trigger the MOSFET in the boost converter circuit. The experimental results show that the InC method can detect the maximum power point with better convergence and higher accuracy than the P&O algorithm under sudden changing irradiance.

Keywords: Maximum Power Point Tracking, Incremental Conductance, Perturb&Observe, Solar Energy

Fotovoltaik Sistemler için Maksimum Güç Noktasının İzlenmesinde Değiştir&Gözlemler ve Artan İletkenlik Algoritmalarının Deneysel Analizi

Öz

Fotovoltaik (PV) sistemler kurulabilir alanlarının fazla olması, çevre dostu ve enerji verimliliği gibi doğal avantajları nedeniyle dünyadaki en önemli enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Fotovoltaik hücreler lineer olmayan akım-gerilim karakteristik yapısına sahiptir. Bu nedenle PV sistemlerden maksimum çıkış gücü elde edebilmek için maksimum güç noktasında (MPP) çalıştırılmalıdır. Günümüz geliştirilmiş birçok optimizasyon algoritması fotovoltaik (PV) üretim sisteminin performansını optimize etmede ve sistemin maksimum güç noktasında çalıştırılmasında önemli bir rol oynar. Bu makalede fotovoltaik sistemlerin maksimum güç noktasının izlenmesinde yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemlerinden Değiştir & Gözlemler (P&O) ve Artan İletkenlik (InC) algoritmalarının hem deneysel hemde Matlab/Simulink benzetim modeli kullanılarak kapsamlı bir değerlendirilmesi sunulmuştur. Deneysel çalışmalar Arduino Uno kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve 1 KHz PWM çıkışı boost konvertör devresindeki mosfetin tetiklenmesi için kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar InC yönteminin ani değişen ışınım altında P&O algoritmasına göre daha iyi yakınsama ve daha yüksek doğrulukla maksimum güç noktasını tespit edebildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Maksimum Güç Noktası İzleme, Artan İletkenlik, Değiştir&Gözlemler, Güneş Enerjisi

* Corresponding Author: mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr

1. Giriş

Dünyada genelinde enerjiye duyulan gereksinimin artması, ülkeler arasında ortaya çıkan siyasi gelişmeler ve fosil yakıtların neden olduğu küresel ısınma gibi birçok faktör enerji arzını etkilemektedir. Günümüzde ihtiyaç duyulan bu enerji arzının büyük bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtların rezervlerinin sınırlı olması ve kullanımlarında ortaya çıkan zararlı sera gazları nedeniyle ülkeler çevreye daha duyarlı ve kendi kaynaklarını daha etkin kullanabilecekleri rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji gibi alternatif yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmektedir. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında fotovoltaik enerji, enerji sorununu aşmada en dikkat çekici yöntemlerden biri olup, daha az bakım gerektirmesi ve uzun bir ekonomik işletme ömrüne sahip olması nedeniyle önemli bir avantajı sahiptir (Tan et al., 2004; Zaki Diab & Rezk, 2017).

Fotovoltaik (PV) modüller güneş enerjisine maruz kaldıklarında, güneşten almış oldukları enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşüm gerçekleşirken, PV sistemler enerji üretiminde birçok çevresel faktörden etkilenmektedir. Ancak solar radyasyon ve sıcaklıkta meydana gelen değişimler PV hücrelerin çalışmasını etkileyen en önemli iki parametreyi oluşturmaktadır. Bu parametrelerin değişimlerine bağlı olarak PV modüller lineer olmayan bir üretim karakteristiğine sahiptir. Bu nedenle her çevresel koşulda PV sistemin maksimum güçte çalışmasını sağlayan tek bir çalışma noktası vardır ve bu nokta maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılır. PV sistemlerden maksimum verim elde edebilmek için sistem MPP noktasında çalıştırılmalıdır. Uygun güç elektroniği ekipmanlarının kullanımı ve mikroişlemci tabanlı izleme algoritmaları (MPPT algoritmaları) kullanılarak PV sistemler maksimum güç noktasında çalıştırılabilir.

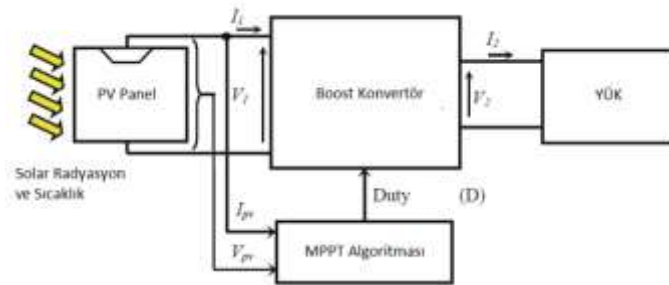
PV sistemler şebekeden bağımsız ya da şebekeye bağlı olarak çalıştırılabilir. Şebekeden bağımsız sistemlerde, MPPT algoritmaları genellikle DC-DC dönüştürücüler yardımıyla uygulanır. Bu sistemlerde fazla enerjiyi depolamak için bataryalar gerekebilir. Şebekeye bağlı sistemlerde ise PV dizisi tarafından üretilen enerji MPPT kontrol kullanılarak DC-DC dönüştürücü yardımı ile DC baraya veya bir invertör kullanılarak AC baraya aktarılabilir. Her iki durumda da PV hücrelerden maksimum verim elde edebilmek için maksimum güç noktasının izlenmesi ve bu amaç için kullanılan MPPT algoritmasının etkinliği oldukça önemlidir.

PV panelinin etkinliğini artırmak için geliştirilmiş çok sayıda maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması geliştirilmiştir (Eltawil & Zhao, 2013). Literatürde bu teknikler arasında: Değiştir & Gözlemlen (Perturb & Observe-P&O) (Femia et al., 2005; Ishaque et al., 2014; Salam et al., 2013), Artan İletkenlik (Incremental Conductance (InC)) (Abdulkadir & Yatim, 2014; Morales-Acevedo et al., 2014; Radjai et al., 2014), Tepe tırmanma (Hill Climbing (HC)) (Xiao & Dunford, 2004) [8], bulanık mantık kontrolü (Rutkowski, 2008) ve Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) teknikleri gibi birçok yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca maksimum güç noktasının izlenmesinde çok sayıda Meta-sezgisel optimizasyon algoritması da geliştirilmiştir (Besheer & Adly, 2012; Kobayashi et al., 2006; Paraskevadaki & Papatthaniassiou, 2011; Sundaeswaran et al., 2015).

Tüm sunulan algoritmalar kararlı koşullar altında MPPT noktasının izlenmesinde oldukça etkilidir. Ancak, ortam koşulları değiştiğinde maksimum güç noktasının yakalanmasında farklı performansla sahip olmaktadır. Bu çalışma Değiştir & Gözlemlen (P&O) ve Artan iletkenlik (InC) algoritmalarının PV sistemlerde maksimum güç noktasının izlenmesindeki performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde PV hücrenin karakteristik yapısı açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada tasarlanan DC-DC Boost konvertörün yapısına ilişkin bilgiler sunulmuştur. Üçüncü bölümde ise Değiştir & Gözlemlen (Perturb & Observe) ve Artan İletkenlik (Incremental Conductance-InC) algoritmalarının çalışma yapıları ayrıntılı açıklanmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümü deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular ve tasarlanan sistemin Matlab/Simulink yardımıyla elde edilen benzetim sonuçları içermektedir. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen bulgulara ilişkin özet bir değerlendirme sunulmuştur.

2. Sistemin Modellenmesi

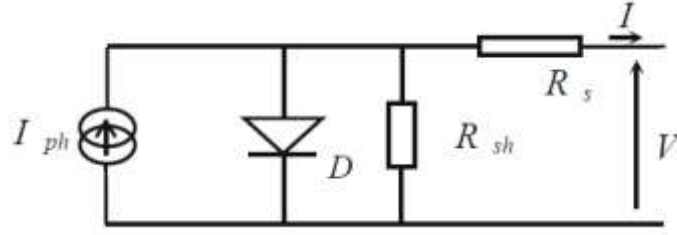
PV sistemin yapısı Şekil 1'de gösterildiği gibi PV modül, DC-DC dönüştürücü ve bir MPPT algoritması bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 1. Fotovoltaik sistem yapısı.

2.1. Fotovoltaik Modül

PV hücreler yarıiletken malzemelerden üretilmiş p-n bağlantılar içermektedir. Bu özelliği ile PV hücrenin çalışma karakteristiği p-n diyot karakteristiğine benzerdir ve bir diyot devre yapısında modellenilebilir. PV hücrenin eşdeğer modelini tek bir diyot kullanarak modelleyen elektriksel devre şeması Şekil 2'de sunulmuştur (Sun et al., 2021).



Şekil 2. PV hücrenin tek diyot eşdeğer devre modeli.

Şekil 2'den görüldüğü üzere, PV panelinin tek diyotlu modeli, bir şönt direnci R_{sh} ve bir seri direnci R_s 'nin yanı sıra, P-N bağlantısını taklit eden bir diyot ile bağlı bir kaynak foton akımı I_{ph} içerir. Bu nedenle, PV akımı denklem (1) ile ifadesi ile tanımlanabilir.

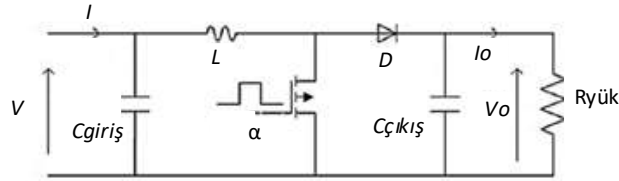
$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left(\frac{V + IR_s}{aKTn_n} \right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Bu ifadede, V , I_{ph} , T , K sembolleri sırası ile bias voltajı, diyot akımı, Boltzman sabiti ve mutlak sıcaklık. Bu çalışmada deneysel uygulamalarda GESPER marka 22 Watt PV panel kullanılmıştır ve PV panele ait karakteristik özellikler Tablo 1'de gösterilmiştir.

2.2. DC-DC Dönüştürücü Tasarımı

DC-DC dönüştürücüler PV panel ile yük arasında bir görev döngüsüne (Duty Cycle) sahiptir ve bu döngüye göre çalışırlar. Bu görev döngüsü kullanılan MPPT algoritması tarafından hesaplanır ve 0 ile 1 aralığında değişir. DC-DC dönüştürücüler boost, sepic, Buck-Boost gibi farklı DC-DC dönüştürücü topolojilerinde olabilir. MPPT'yi iyi tasarlayabilmek için maksimum güç noktasındaki gerilim ve akıma bağlı olarak tanımlanan PV dizisinin optimal direnci (R_{mpp}) bilinmelidir. Sonrasında ise yük direncinin değeri DC-DC dönüştürücünün tipine göre belirlenir (Aygül et al., 2019).

Bu çalışmada R_{mpp} 'den daha büyük bir yük empedansının kullanılması gereken Şekil 3'deki elektriksel sistem yapısında Boost tipi DC-DC konvertör kullanılmıştır.



Şekil 3. DC-DC Boost Dönüştürücü.

Bu dönüştürücünün denklemleri görev döngüsüne bağlı olarak aşağıda gösterilmiştir:

$$V_0 = \frac{V}{1 - \alpha} \quad (2)$$

$$I_0 = I \cdot (1 - \alpha) \quad (3)$$

Bu denklemlerde; α - görev döngüsü, V dönüştürücü giriş gerilimi, V_0 ve I_0 ise sırası ile dönüştürücünün çıkış gerilimi ve çıkış akımıdır. Çalışmada tasarlanan Boost konvertörün parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

3. MPPT Algoritmaları

Çalışmanın bu bölümünde değiştir ve gözlemler (Perturb&Observe-P&O) ve Artan İletkenlik (Incremental Conductance-InC) algoritmalarının çalışma yapıları ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Değiştir ve Gözlemler (P&O) Algoritması

Değiştir ve gözlemler (P&O) algoritması, fotovoltaik panellerin karakteristiğini tanımlamada kullanılan güç-gerilim (P-V) eğrisinden faydalanılarak geliştirilmiştir. P&O algoritmasında panel gücü sürekli olarak izlenir (Tekeshwar Prasad Sahu and T. V. Dixit, 2014) İzlenen güç değerine bağlı olarak sistemin maksimum güç noktasına ulaşmak için panel geriliminde artırma ve azaltma yapılır. Her bir artırım ve azaltım işleminden sonra güçteki değişim hesaplanır. Eğer artış pozitif değerde ise çalışma gerilimi tekrar artırılır. Bu işlem DC-DC konvertör modülünde mosfete uygulanan görev döngüsü ile gerçekleştirilir ve panelin maksimum güç noktasına ulaşması sağlanır. Bu işlem sırasında sürekli olarak bir denetleme yapıldığından panel gücündeki değişimler küçük dalgalanmalar içerir (Rajiv Roshan; Yatendra Yadav; S Umashankar; D Vijayakumar; D P Kothari, n.d.) Algoritmanın çalışmasında izlenen gücün maksimum güç noktasının sağında veya solunda olması durumuna bakılır. Eğer hesaplanan güç değeri maksimum güç noktasının sağındaysa gerilim değeri artırılarak güç değerinin de artırılması sağlanır. Bu durumda şayet gerilim değeri azaltılırsa güç değeri de azalacaktır. Ters olarak izlenen güç maksimum güç noktasının sol tarafında ise gerilim değeri artırıldığında ilk durumun tersi olarak güç azalacaktır. Gerilim değeri azaltıldığında ise güç artacaktır. Böylece gerilim değişimindeki değere bağlı olarak güçteki değişim izlenir ve sonraki

adımda izlenecek gerilim değerine karar verilir. Değiştir ve gözlemler algoritması için maksimum güç noktasına ulaşmada izlenen gerilim değişim kararı Tablo 3’de verilmiştir. Algoritmanın işleyişini gösteren akış diyagramı ise Şekil 4’ de sunulmuştur.

Tablo 1. Standart koşullarda GESPER 22 W fotovoltaik panel karakteristikleri.

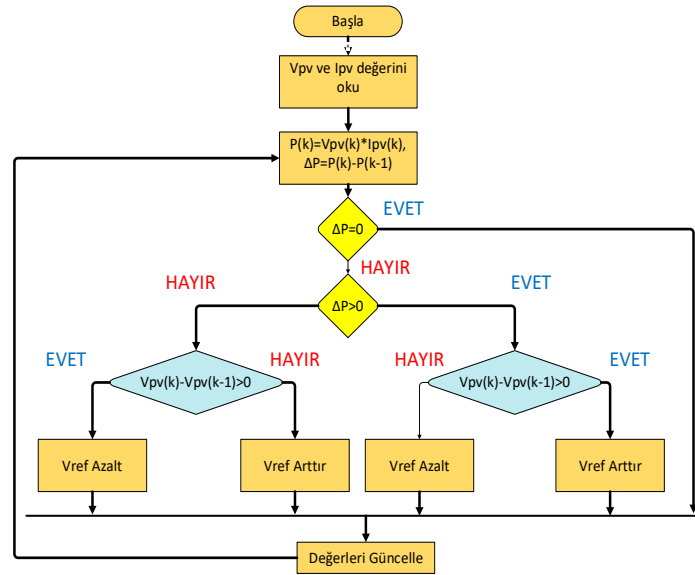
c	Değerler
MPP	22 W
V_{mp} (MPP gerilimi)	18.92 V
I_{mp} (MPP akımı)	1.25 A
I_{sc} (Kısa Devre Akımı)	1.31 A
V_{oc} (Açık Devre Gerilimi)	22.58 V
K_v (V_{oc} 'nin sıcaklık çarpanı)	-0.3409
K_i (I_{sc} 'nin sıcaklık çarpanı)	0.0447
N_s (Hücre Sayısı)	16
I_s (Diyot Saturasyon Akımı)	2.679e-11
İdealite faktörü	1.0036

Tablo 2. Boost DC-DC Dönüştürücünün parametreleri

Parametre	Değerler
İndüktör (L)	20 mH
Giriş Kondansatörü (C_{in})	470 μ F
Çıkış Kondansatörü (C_{in})	220 μ F
Anahtarlama Frekansı	1 kHz
Yük direct	47 Ω

Tablo 3. Gerilim değeri değişimi karar tablosu.

Gerilim Değerindeki Değişim	Güçteki Değişim	Değişimin Yönü
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif



Şekil 4. Değiştir & Gözlemler Algoritması Akış şeması.

3.2. Artan İletkenlik (InC) Algoritması

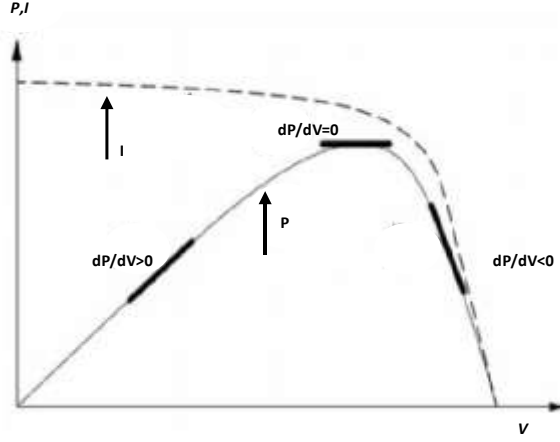
Artan iletkenlik algoritmasında Şekil 5’de gösterildiği gibi güneş panelinin güç karakteristiğinden faydalanılır. Panelde maksimum güç noktasında eğim sıfır olacaktır. Maksimum güç noktasının sağında eğim pozitif, solunda ise eğim negatif olacaktır. Bu karakteristik eğriden faydalanarak aşağıdaki denklemler ile ifade edilir (BADAK & YILDIZ, 2021).

$$\frac{dP}{dV} = 0, \text{Maksimum güç noktası} \quad (4)$$

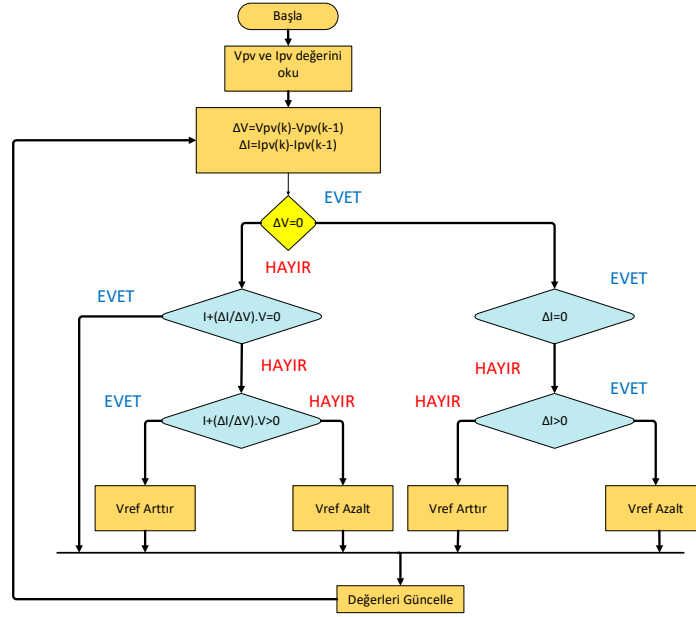
$$\frac{dP}{dV} > 0, \text{Maksimum güç noktasının solu} \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0, \text{Maksimum güç noktasının sağı} \quad (6)$$

Bu eşitlikler dikkate alınarak artan iletkenlik algoritmasının akış şeması ise Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 5. PV hücrede artan iletkenlik algoritmasının çalışma eğrisi.



Şekil 6. Artan İletkenlik Algoritması Akış Şeması.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmanın bu bölümünde, Bölüm 2 ve Bölüm 3'de açıklanan DC-DC konvertör yapısı ve sunulan optimizasyon algoritmaları kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen panel gücü ve MPPT noktasının izlenmesi grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen güç değerleri ile P&O ve InC algoritmaları ile elde edilen maksimum güç noktasındaki salınım değerleri ve algoritmaların yakınsama süreleri karşılaştırılmıştır.

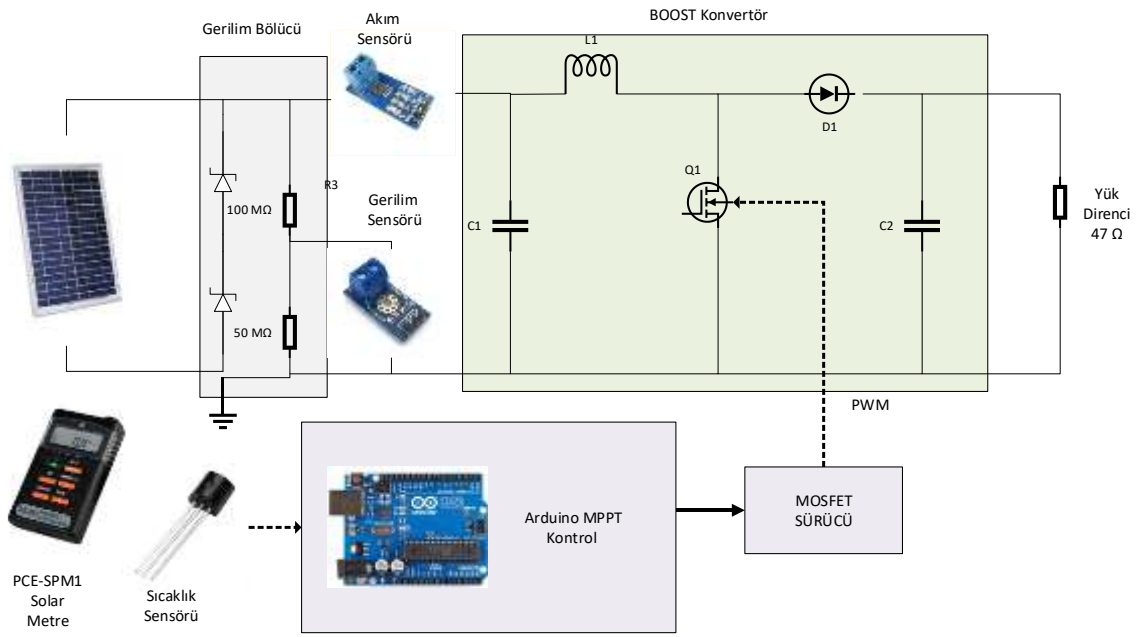
Bu çalışmada maksimum güç izleyici Arduino Uno kullanılarak Atmega 328 işlemci yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Maksimum güç izleyici için tasarlanan sistem yapısı ve bu sistem yapısına göre hazırlanan ölçüm düzeneği sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Boost DC-DC dönüştürücü yapısında kullanılan devre elemanları için Tablo 2'de sunulan parametreler kullanılmıştır. Akım ve gerilim ölçümüne Arduino ile uyumlu ACS712-20A akım sensörü ve voltaj sensörü yardımıyla akım, gerilim değerleri ölçülerek, hesaplanan güç değerleri kayıt altına alınmıştır. Kayıt işleminde Arduino uyumlu SD kart modülü dataloger olarak tasarlanmıştır. Arduino 1 KHz PWM frekansına sahiptir ve bu frekans değerinde mosfet sürücü yardımı ile MOSFET'in tetiklenmesi gerçekleştirilmiştir.

Sistemde solar radyasyon değişimine bağlı olarak MPPT yakınsama sürelerinde değerlendirilmiştir. Sistemin çalışma koşullarındaki sıcaklık değeri sıcaklık sensörü yardımı ile ve solar radyasyon değerleri ise endüstriyel PCE-SPM1 Solar Metre kullanılarak ölçülmüştür.

Sıcaklık ve solar radyasyon durumunda PV hücrenin üretmiş olduğu maksimum güç noktasına ilişkin karakteristik eğriler tasarlanan özel bir devre yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devre için patent ön araştırması devam ettiği için IV ölçümü ve devre yapısı detaylı olarak sunulmamıştır.

Çalışmada kullanılan GESPER 22W fotovoltaiik panel için fotovoltaiik sistemin tek diyot devre modeli ve deneysel olarak ölçülen I-V eğrisi ile P-V karakteristik eğrisi Şekil 9’ sunulmuştur. Karakteristik ölçümü 954 W/m² solar radyasyon ve 29 C⁰ sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Solar radyasyon değişiminde sunulan sistemin yakınsama süresi ve değerlerini gözlemleyebilmek için panel üzerine gölgeleme yapılmıştır.

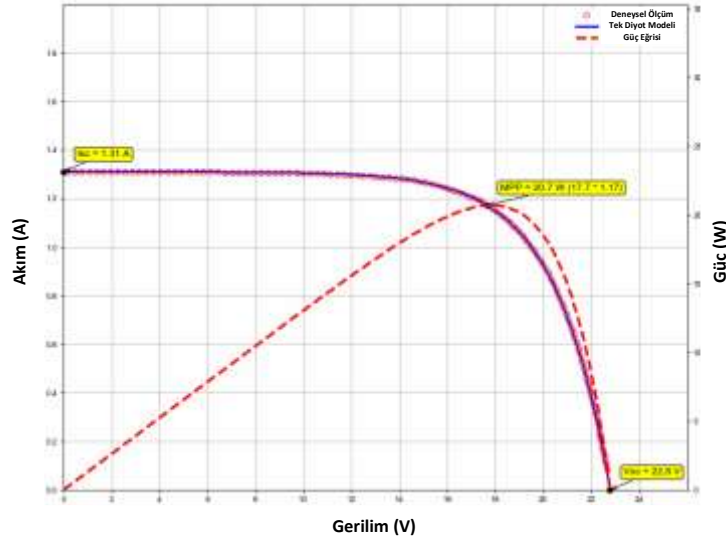
Ayrıca teorik sonuçlar ile uygulanan sistemin doğruluğunu test etmek için sistem Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan MPPT modeli Şekil 10’da sunulmuştur. Bu modelde PV panelin modellenmesinde Tablo 2’de sunulan karakteristik değerler kullanılmıştır. Bu değerlere bağlı olarak PV hücrenin farklı solar radyasyona maruz kalması durumundaki karakteristik eğriler 1000 W/m², 900 W/m² ve 250 W/m² ışınım değerleri için Şekil 11’de gösterilmiştir.



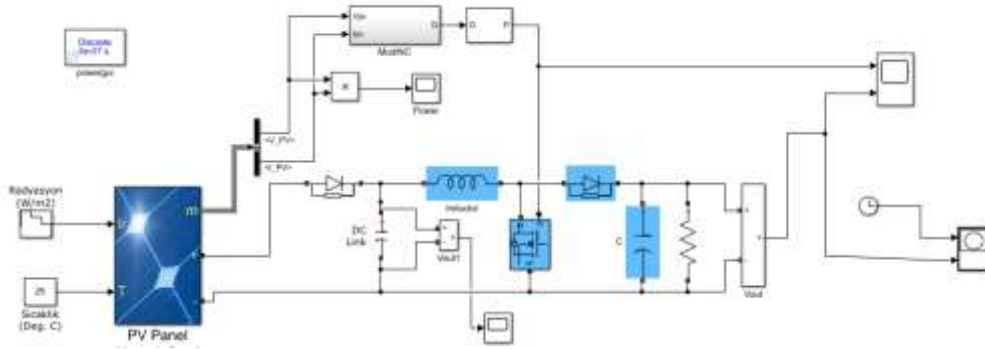
Şekil 7. Deneysel olarak tasarlanan MPPT sistemi.



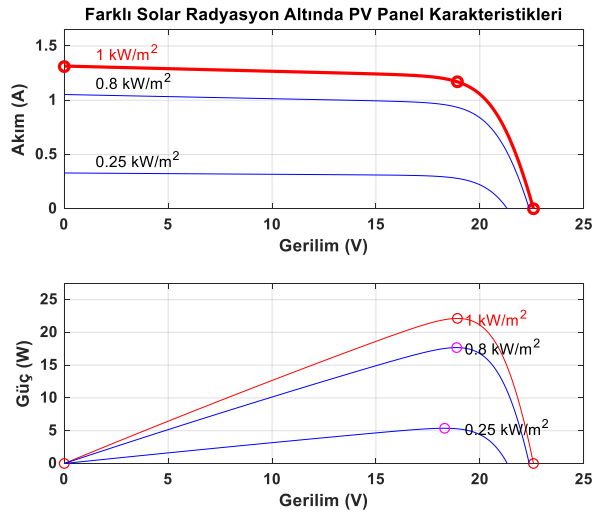
Şekil 8. Deneysel ölçüm düzeneği.



Şekil 9. PV panel için tek diyot modeli ve deneysel olarak elde edilen I-V ve P-V karakteristikleri (1000 W/m^2 ve 29 C^0 'de).

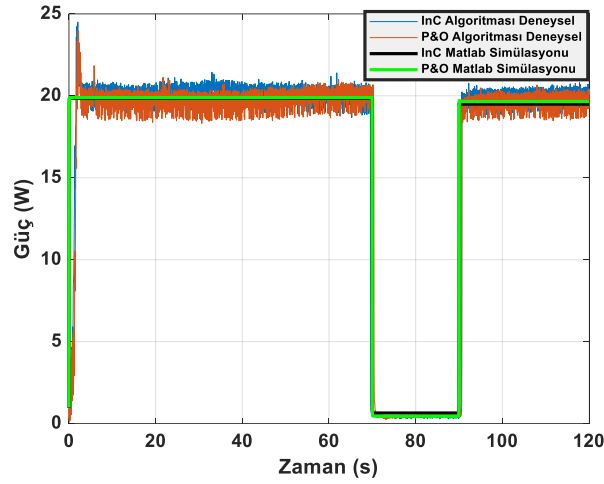


Şekil 10. Sunulan MPPT Sisteminin Matlab/Simulink Sistem Modeli.

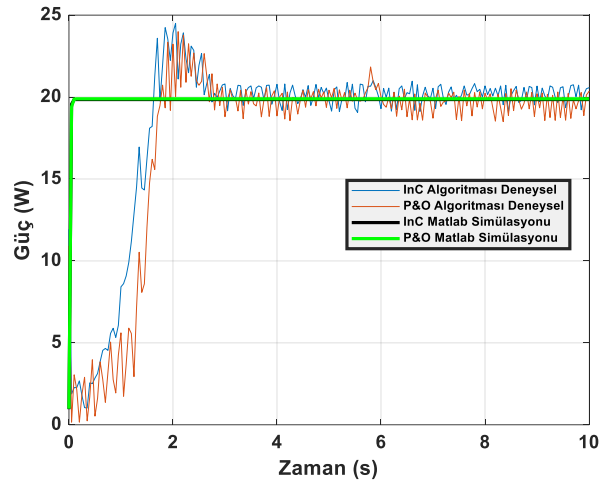


Şekil 11. PV panelin farklı solar radyasyon altında Matlab/Simulink ile elde edilen I-V ve P-V karakteristik eğrileri (29 C^0 'de).

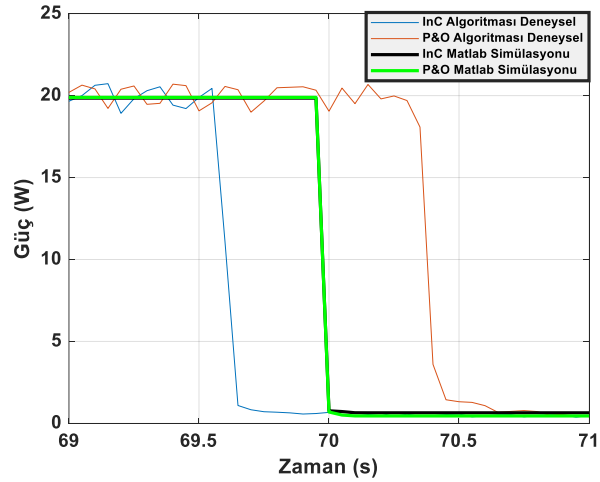
Şekil 7'de sunulan deneysel ölçüm düzeneği kullanılarak 930 W/m^2 ve 29 C^0 sıcaklıkta deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı koşullar altında Şekil 10'da sunulan Matlab/Simulink modeli ile simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Sistem 120 saniyelik ölçüm aralığında 0.05 saniye örnekleme periyodu ile kayıt altına alınmış ve güç eğrileri incelenmiştir. Sistemin MPPT noktasını yakalama süresi, salınım değerleri ve algoritmaların yakınsama sürelerini değerlendirebilmek için 70-80. saniyelerde PV panel üzerine gölgeleme yapılarak solar radyasyon değerinin 110 W/m^2 solar radyasyon değerine hızla düşmesi ve yükselmesi durumundaki değişikliklerde incelenmiştir. Deneysel ve Benzetim sistemi yardımı ile sunulan MPPT algoritmaları kullanılarak maksimum güç noktasını izleme eğrileri sırası ile Şekil 12-15 de sunulmuştur.



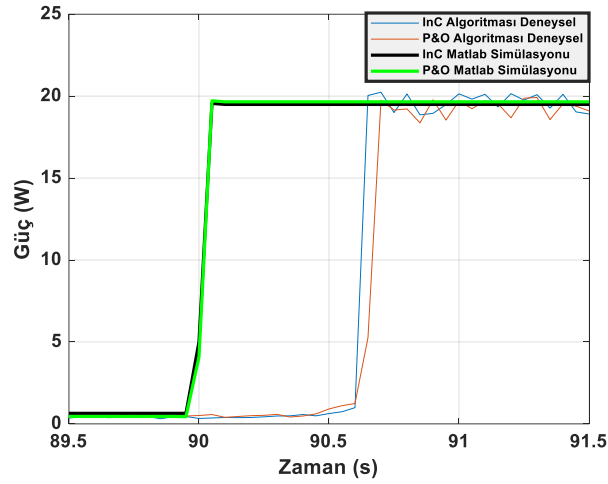
Şekil 12. Deneysel ve Simülasyon yardımı ile maksimum güç noktasının elde edilen güç değişim eğrileri.



Şekil 13. Deneysel ve Simülasyon yardımı ile maksimum güç noktasının elde edilen 0-10 saniye aralığında maksimum güç noktasının izlenmesinde elde edilen güç değişim eğrileri.



Şekil 14. Deneysel ve Simülasyon yardımı solar radyasyonun 100 W/m^2 değerine hızlı düşmesi durumunda maksimum güç noktasının izlenmesinde elde edilen güç değişim eğrileri.



Şekil 15. Deneysel ve Simülasyon yardımı solar radyasyonun 930 W/m^2 değerine hızlı yükselmesi durumunda maksimum güç noktasının izlenmesinde elde edilen güç değişim eğrileri.

Şekil 13'den görüldüğü gibi deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmalarda maksimum güç noktasını yakalama süresi hem P&O hem de InC algoritması için yaklaşık olarak 3 saniye olmaktadır. Bu süre Arduino PWM çıkışı olan 1 kHz frekans değerini arttırarak azaltılabilir. Maksimum güç noktasının yakalanmasından sonra ise solar radyasyonun hızlı değişimine her iki algoritmada yüksek hassasiyetle tepki vermektedir ve sistem yaklaşık 0.1 saniyede MPPT noktasını yakalamaktadır. Algoritmaların salınım değerleri, MPPT noktasını yakalamadaki yakınsama süreleri özet olarak Tablo 4'de sunulmuştur. Gerçekleştirilen ölçüm periyodunda 930 W/m^2 'de gerçekleştirilmiştir ve bu değerde solar panel 20,4 Watt güç üretmektedir.

Deneysel Sonuçlar					
Algoritma	V_{\min}	V_{\max}	V_{ort}	Yakınsama Süresi	Verim
InC	17,79	21,04	20,10	0.022	0,985
P&O	18,32	21,84	19,73	0.027	0,967
Benzetim Sonuçları					
InC	19,890	19,899	19,89	0.08	0,975
P&O	19,89	19,89	19,84	0.08	0,972

4. Sonuç ve Öneriler

Bu makalede uygulamada sık kullanılan bazı önemli MPPT algoritmaları arasında karşılaştırmalı bir analiz hem deneysel hem de Matlab/Simulink benzetim modeli kullanılarak sunulmuştur. Bu karşılaştırmada, verimlilik ve yakınsama süresi gibi MPPT sonuçlarının analizine odaklanılmıştır. Maksimum güç noktası izleme algoritmaları için GESPER 22W güneş panelinin MATLAB Simulink tabanlı bir matematiksel modeli oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan model deneysel olarak çalıştırılmıştır. Çalışma, Değişir ve Gözlemler (P&O) ve Artan İletkenlik (InC) algoritmaları incelenmiştir. Deneysel sonuçlar artan İletkenlik yönteminin P&O algoritmasından daha iyi yakınsama ve verim değerine sahip olduğunu ve daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu algoritmalar fotovoltaik sistemin hem dinamik hem de kararlı durumlarında kullanılabilir. Ayrıca sunulan yaklaşım ile, DC-DC dönüştürücü sisteminin verimliliğini de artırılabilir.

Geleneksel P&O ve InC yöntemleri genellikle küçük ve sabit bir iterasyon adım boyutu kullanır, bu da özellikle hızla değişen ışınlama koşulları altında dinamik izleme hızından ödün verir. Kararlı durum salınımları ve dinamik davranış arasındaki bu dengelyi ele almak için, uyarlanabilir değişken yineleme adım boyutlarına sahip çeşitli modifiye P&O ve INC yöntemleri önerilebilir. Gelecekteki çalışmalarda bu değiştirilmiş yöntemleri incelemeye odaklanarak algoritmaların parçalı gölgeleme altındaki durumları incelenecektir.

5. Teşekkür

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (CUBAP) tarafından HAMYO-003 numaralı proje numarası ve TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2021 yılı 2 dönem projeleri kapsamında 1919B012111890 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar çalışmayı destekleyen kuruluşlara katkılarından dolayı teşekkür etmektedir.

Referanslar

- Abdulkadir, M., & Yatim, A. H. M. (2014). Hybrid maximum power point tracking technique based on PSO and incremental conductance. *2014 IEEE Conference on Energy Conversion, CENCON 2014*, 271–276. <https://doi.org/10.1109/CENCON.2014.6967514>
- Aygül, K., Cikan, M., Demirdelen, T., & Tumay, M. (2019). Butterfly optimization algorithm based maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading condition. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 00(00), 1–19. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1677818>
- BADAK, U., & YILDIZ, A. B. (2021). Maksimum Güç Noktası İzleyici Algoritmalarının Verim, Salınım Miktarı ve Yakınsama Süresi Açısından Karşılaştırılması. *European Journal of Science and Technology*, 21, 463–472. <https://doi.org/10.31590/ejosat.822975>
- Besheer, A. H., & Adly, M. (2012). Ant colony system based PI maximum power point tracking for stand alone photovoltaic system. *2012 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2012, Proceedings*, 693–698. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2012.6210019>
- Eltawil, M. A., & Zhao, Z. (2013). MPPT techniques for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 793–813. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.022>
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., & Vitelli, M. (2005). Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), 963–973. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2005.850975>
- Ishaque, K., Salam, Z., & Lauss, G. (2014). The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions. *Applied Energy*, 119, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.054>
- Kobayashi, K., Takano, I., & Sawada, Y. (2006). A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18–19), 2975–2988. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.050>
- Morales-Acevedo, A., Diaz-Bernabe, J. L., & Garrido-Moctezuma, R. (2014). Improved MPPT adaptive incremental conductance algorithm. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 5540–5545. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049347>
- Paraskevadaki, E. V., & Papathanassiou, S. A. (2011). Evaluation of MPP voltage and power of mc-Si PV modules in partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(3), 923–932. <https://doi.org/10.1109/TEC.2011.2126021>
- Radjai, T., Rahmani, L., Mekhilef, S., & Gaubert, J. P. (2014). Implementation of a modified incremental conductance MPPT algorithm with direct control based on a fuzzy duty cycle change estimator using dSPACE. *Solar Energy*, 110, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.014>
- Rajiv Roshan; Yatendra Yadav; S Umashankar; D Vijayakumar; D P Kothari. (n.d.). *Modeling and simulation of Incremental conductance MPPT algorithm based solar Photo Voltaic system using CUK converter*.
- Rutkowski, L. (2008). Computational intelligence: Methods and techniques. In *Computational Intelligence: Methods and Techniques* (1st ed.). Berlin: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-76288-1>
- Salam, Z., Ahmed, J., & Merugu, B. S. (2013). The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review. *Applied Energy*, 107, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.008>
- Sun, L., Wang, J., & Tang, L. (2021). A Powerful Bio-Inspired Optimization Algorithm Based PV Cells Diode Models Parameter Estimation. *Frontiers in Energy Research*, 9(April), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.675925>
- Sundareswaran, K., Vignesh kumar, V., & Palani, S. (2015). Application of a combined particle swarm optimization and perturb and observe method for MPPT in PV systems under partial shading conditions. *Renewable Energy*, 75, 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.044>
- Tan, Y. T., Kirschen, D. S., & Jenkins, N. (2004). A model of PV generation suitable for stability analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(4), 748–755. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827707>
- Tekeshwar Prasad Sahu and T. V. Dixit. (2014). No Title. *Modelling and Analysis of Perturb & Observe and Incremental Conductance MPPT Algorithm for PV Array Using Cuk Converter*.
- Xiao, W., & Dunford, W. G. (2004). A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 3, 1957–1963. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355417>
- Zaki Diab, A. A., & Rezk, H. (2017). Global MPPT based on flower pollination and differential evolution algorithms to mitigate partial shading in building integrated PV system. *Solar Energy*, 157, 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.024>